打造 TC2.0 时代，倍增地面路网的通行能力

王大海[1] 王茜[2]
[1]（北京汇海博科技发展有限公司 CEO,北京 100022）
[2]（中国移动北京公司，北京 100007）

中文摘要：
[目的]综述了交通信号控制(Traffic Control，TC)的 32 个质变创新技术和安全立法，试图打造 TC2.0 时代。
[方法]通过绘制进口停止线截面上车辆驶入流率-时间的变化规律，更直观地展示了 TC2.0 时代最优方案.最优方案数量是有限的，可利用信号机高存储能力，离线建立其整体数据库。
[结果]针对交通需求，实现对应最优方案的在线自适应快速搜索。使方案的在线自适应匹配、变换用时大大缩短。相比传统最优方案，可倍增路网瓶颈的十字路口乃至路网通行能力。
[局限]新方案替代现行方案的转换过程必须保证交通安全，保证各绿灯间隔时间不小于对应最短值；保证所有倒计时和行人绿闪显示信息真实可信。
[结论]应尽早制定 TC2.0 时代技术标准，推广 TC2.0 专利技术，享受 TC2.0 红利。
关键词：城市交通；信号控制；通行能力。
图书分类号：U491.9+2；U491.2+65

chinaXiv:201606.00173v1

Making the TC2.0 era;

Doubling the ground traffic capacity of road network

Wang Da-hai[1] ,Wang Qian[2]
[1]（Beijing HHB Sci.& Tech. Co. LTD, Beijing 100022）
[2]（China Mobile Group Beijing Co. LTD, Beijing 100007 ）

Abstract:
[Objective]A series of qualitative leap technology and legislations have made the TC2.0 era.
[Methods] By importing stop line cross section drawing vehicle flow rate - the change rules of time, more intuitive to show its optimal scheme compared with the traditional optimal scheme, TC2.0 optimal scheme has limited number, to create the database offline.
[Results]For traffic demand, realize the corresponding online adaptive quick search of the best scheme, make the time shorten and frequency, for the scheme design and transformation.can double the capacity of the intersections, equivalent to add a ground network.
[Limitations]New alternative to the existing scheme of conversion process must ensure traffic safety, ensure the corresponding green light interval time should not less than minimum value; Ensure that all the countdown and pedestrian green flash display information.
[Conclusions]Should formulate TC2.0 standards as soon as possible, promote TC2.0 patent technology, enjoy TC2.0 dividends.
Keywords: City traffic; Traffic signal control; Capacity of road network

[1] 作者简介：王大海（1948-），男，山东乳山人，博士、研究员，*通信作者：wang6dh@163.com.

1．TC 发展将进入新常态的 TC2.0 时代

交通信号控制(Traffic Control，TC)系统([1]、[2])已上百年，建立并维持了交通秩序，繁荣经济，功不可没。

目前交通伤害和拥堵广泛发生，尾气污染严重。联合国大会[3]认为，应由道路交通系统设计者、而不是道路使用者负主要责任。道路交通系统设计者主要包括道路管理者、汽车行业、警察、政界人士和立法机构。 还有许多其它机构也在道路安全领域负有责任，如卫生服务部门、司法系统、学校和非政府组织等。道路使用者个人负有遵纪守法的责任。

2013 年开年“黄灯周”后，全民都在思考：取消了“黄灯禁行”，如何保证交通安全呢？大讨论引发了大智慧。人类总是经历事物正反面发展、总结正反面经验，才对事物有一个完整认识，才能认识事物规律与本质：

因高速运动的车辆动能不能在 0 秒内释放，在黄灯期间进入路口的尾车行为合理，为防止发生交通冲突，只能严格约束与尾车发生冲突的另一方[10],[17]，应立法：“新进入路口的首车须礼让其它车辆先行”。

① 责任者首车位置明确：须礼让其它车辆先行；

② 违法行为易借摄像头取证，方便执法。

执法严明后，为尽职尽责，有效实现礼让，首车应慢行。此“慢行保让行”的安全需求，四两拨千斤，可启发得到下面的里程碑创新 2.13，也如同工业进入 4.0 时代，宣告了 TC 发展将进入新常态的 TC2.0 时代，出现了一系列新技术的质变飞跃，可倍增路网通行能力。新常态，就是经过一段不正常状态后，恢复到的一种新正常状态。

2、TC2.0 时代自主研制的其他里程碑式创新

2.1、定义了框架车流[9]：行人和非机动车通行能力可通过拓宽其过路宽度而增加。而机动车进口道数量则限于路口四角建筑，难以增加，故提高通行能力应特别关注存在机动车间冲突的车流，称为**框架车流**。

用此概念定义 TC 的相位、相位阶段等基本概念，可摆脱行人和非机动车、右转、掉头信号灯的干扰，恢复本来含义[6]。避免概念混乱[1],[12]影响理解。

2.2、提出了最短绿灯间隔时间的存在性和计算方法：

东直 →1 西左 →4 北直 →1 南左 →3 东直

西直 →2 东左 →3 南直 →3 北左 →2 西直

图 1 十字交叉口的“先直后左”的网络图和链族

Fig.1,The "first straight then left" network diag. for the intersection

关键路线是由绿灯配时中起决定作用的关键车流组成的周期路线，见图 1：

$$C=\sum(G_i+I_{ij}) \quad (1)$$

式中：C 是信号周期，（s）；

G_i 是关键车流绿灯时间；

I_{ij} 是从上一股交通流 i 进口绿灯结束时刻到下一股冲突交通流 j 出口绿灯开始时刻的绿灯间隔时间。只要 I_{ij} 足够大，就可保证冲突交通流 i、j 不发生冲突。

在安全前提下。绿灯间隔时间 I_{ij} 必存在最短值[9]：

$$I_{mij}=A+\mathrm{Max}\{t_{ci}\}-\mathrm{Min}\{t_{ej}\} \quad (2)$$

可保证即使绿灯 i 尾车在黄灯末越过停止线，并以最慢速度 $\mathrm{Min}\{v_{ci}\}$ 前进，也能在绿灯 j 放行首车以最快速度 $\mathrm{Max}\{v_{ej}\}$ 到达关键点之前，越过关键点，不发生冲突。若出现极端情况，“首单元礼让尾单元”者也不会久等。

式中：A——黄灯时间，(s)；

t_{ci}——绿灯 i 尾车通过清空距离所用时间，(s)；

清空距离——绿灯 i 尾车从其停止线**越过**关键点所走距离，(m)；

$\mathrm{Max}\{t_{ci}\}$——t_{ci} 累积分布函数的 85%位值[13]，(s)；

t_{ej}——绿灯 j 首车通过进入距离所用时间，(s)；

进入距离——绿灯 j 首车从其停止线**到达**关键点所走距离，(m)；

$\mathrm{Min}\{t_{ej}\}$——t_{ej} 累积分布函数的 15%位值[13]，(s)。

式(2)的结构虽与[12]的公式相类似，但每一项都更安全，更能够放心地满足工程实用。

2.3、通过把绿灯时间当作节点，绿灯间隔时间当作弧线，建立了十字交叉口配时网络图和方案框架。把全部周期路线完备分类为 22 个相互独立的链族。

纠正了[2]网络图错把具有不同值的绿灯间隔时间当作同一节点的方法，该法难以划分链族。

沿关键路线有传统周期损失时间 L 定义[1]、[2]：

$$L=C-\Sigma G_{ei}=\Sigma I_{ij}-(A-l)\times n \quad (3)$$

式中：G_{ei}是有效绿灯时间，（s）；

n 为关键路线中绿灯间隔时间数量；

A 为黄灯时长，（s）；

l 为绿灯损失时间，（s）。

可把周期损失时间 L 推广定义到所有周期路线上，计算各链族的平均周期损失时间 L。可发现“先直后左”链族的平均周期损失时间 L 最小，应优先选用。

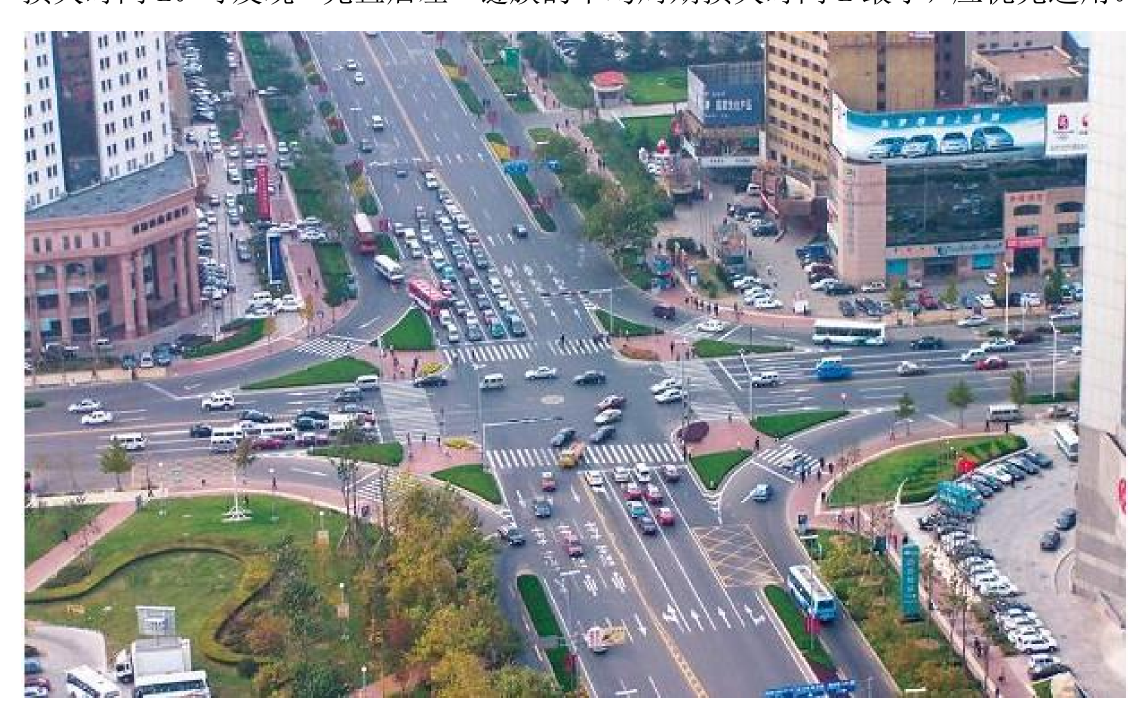


图 2、传统标准渠化十字路口

Fig.2 The traditional channelized intersection

2.4、对未设待行区路口进行最优渠化，如图 3，可较传统渠化图 2，使“先直后左”链族各绿灯间隔时间的清空距离更大，进入距离更小，平均周期损失时间 L 更小,进入负值，成为每周期附加放行时间。

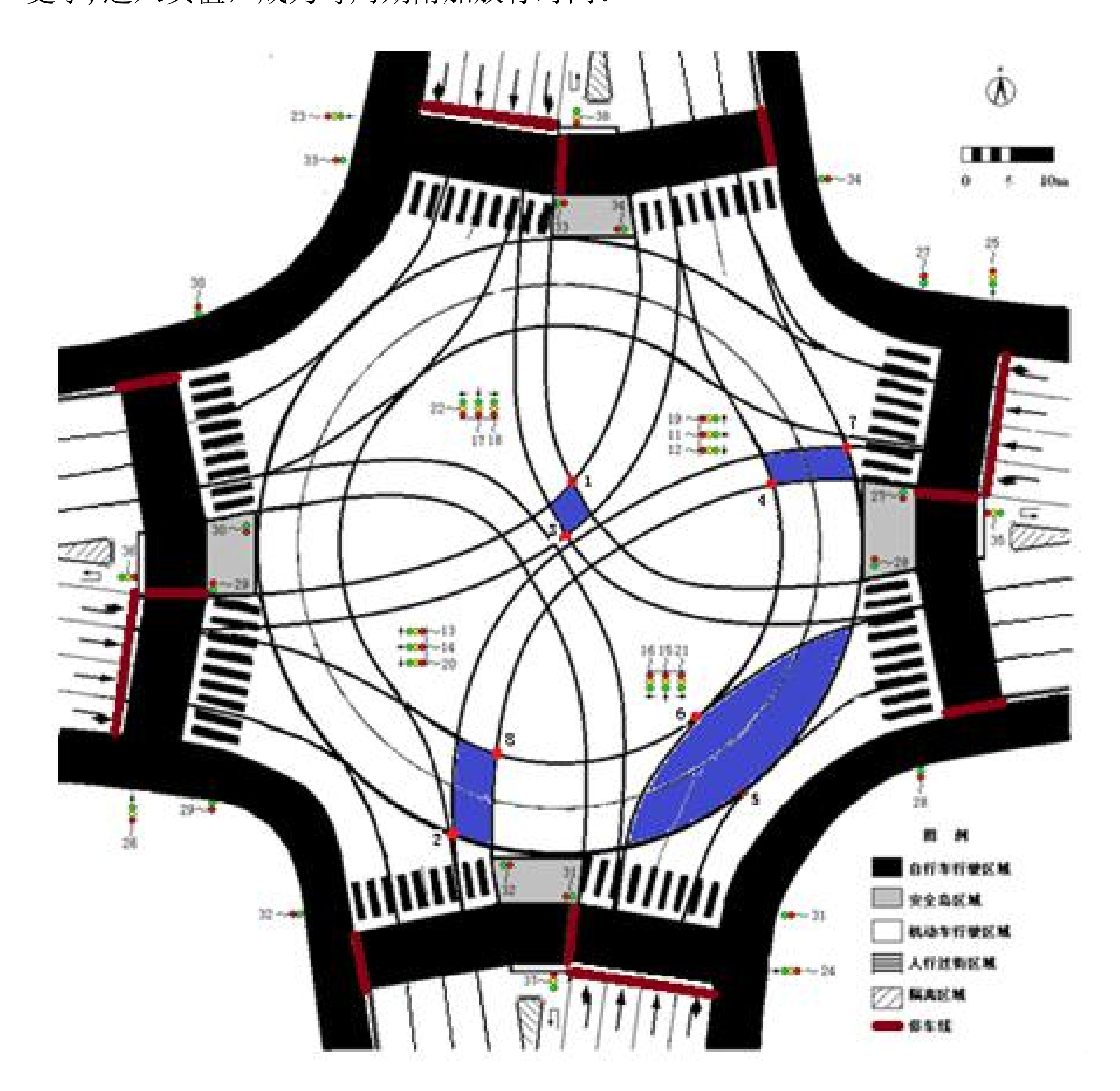


图 3、无待行区最优道路渠化方案

Fig.3 For optimal road channelized scheme without any waiting area

2.5、记 $X=\sum(I_{ij}-I_{mij})$，则(2)使(3)可转化为：

$$L=\sum(\mathrm{Max}\{t_{ci}\}-\mathrm{Min}\{t_{ej}\})+I\times n+X \qquad (4)$$

提出各个绿灯间隔时间之间使 X 最小的融合优化，即具有 4 个绿灯间隔时间的同一相位间隔时间内 2 直向$\{I_{ij}\}$之和应等于 2 斜向$\{I_{ij}\}$之和，见图 1。为缩小 L 可尽可能缩小 X。

2.6、设置进口红灯、黄灯信号个位倒计时，可降低绿灯损失时间 I。使周期尽可能小的方案，则可提高一个周期内附加放行时间的时间比例，即可用于车辆通行的时间比例，绿信比 $\lambda_j=G_{ej}/C$，从而提高路口整体放行能力。

2.7、提出各绿信比需求概念，记为：

$$\underline{\lambda}_j=Q_j/qn_jQ_{sj} \qquad (5)$$

式中：Q_j——框架车流 j 的实际到达的车流量，（pcu/h）；

G_{ej}——车流 j 有效绿灯时间，(s)；

N_j——车道数；

Q_{sj}——单车道饱和车流量，（pcu/h）；

Q——饱和度上限。

针对负值领域可提出优化性能指标，有：

2.8、绿灯配时最佳匹配指标[9]2010：在 L 为负值领域，控制方案的优化指标应在饱和时使关键路线上 $\Sigma\lambda_j$ 最大，且在未饱和时，能与流量需求比例有最佳匹配自适应，在使所有 $\lambda_j \geqq \underline{\lambda}_j$, j∈$\underline{8}$，的前提下，使周期 C 最小。

这是一个由四个参数：流量需求比例最佳匹配、饱和度、周期损失时间和周期，有机组合的优化性能指标。

按该指标从最小周期开始方案搜索、设计[9]和[10]，可同时解决设计的 5 个关键问题：

1）给路口流量需求状态划分界限，进行分类[14-20]；

2）找出关键路线[2]；

3）给出优化的周期损失时间 L；

4）给出优化的框架车流绿灯配时的框架；

5）给出其它交通流绿灯配时的参考点。

相比传统 Webster 的指标[2]“车辆平均延误时间最小”，更直观、更可信，易解析、易运作。

2.9、里程碑创新 1-8 申请了 PCT，已获中、俄、美、澳、日五国专利授权保护。

图 3 的最优道路渠化和最优控制方案，可比 2000 年以前的无待行区标准路口图 2，和当时的所谓最优控制方案“先左后直”，提高通行能力 1.4 倍强[9]和[10]。

2.10、“先直后左”恰是可设置待行区的最好相位顺序；

TC2.0 科学就存在这么多的巧合。因为有：

待行区可设原理[4][5]：实行右侧行车规则的国家和地区，若十字交叉口进口道，按顺序从路中到路边排列为：左、直、右，则“先直后左”的相位顺序，使各框架车流进口车道向路口内连续延伸的一块区域上,在紧靠其整幅放行前一段时间内，无其它交通流通行；可设为该框架车流的<u>待行区</u>，允许该车流在该段时间进入；该段时间称为<u>可提前进入时间 G_{jf}</u>；待行区长度为进口停车线到终点线的最小行程距离 Min{s_j}。东、南、西、北顺时针单放的相位顺序亦可使所有框架车流皆可设待行区，但长度相对略短。

TC2.0 除特殊说明外，皆针对“先直后左”相位顺序进行论述。设计就要设计最好的。

显然，这些待行区的空间资源和可提前进入待行区的时间资源也是一种交通资源。为快速有效疏解交通，对这些待行区的空间资源和可提前进入待行区的时间资源应积极地合理开发利用。如图 4 所示。

待行区技术始于[14],有许多研究[6-9]、[18-20]。但缺少如下 2.11-13，有许多缺陷。最严重的是待行区太小，必须二次停车。如图 5 所示。

2.11、图 3 的最优渠化，恰可把各待行区设置得最长，待行区内车道数最多。显然，图 4 渠化方案是图 3 专利的应用，享有同样专利保护范围。与图 3 专利组成 TC2.0 成套专利技术。

2.12、为分别显示通过待行区进口线、终点线路权，应分别设置进、出口信号灯。各司其职，各尽其责。不再与通过整个路口的路权混为一谈，如图 4。更不

能借助其它信号灯信号进入待行区[14]。也只有这样，才能有后面的里程碑创新 2.14。

图 4 中，与里程碑创新 1 款相呼应，进口停车线向外移动了十多米。既方便行人、非机动车在路口内道路拓宽，又有利于待行区长度适度扩大。但分析表明，这种扩大只增加秩序，并不提高通行能力。

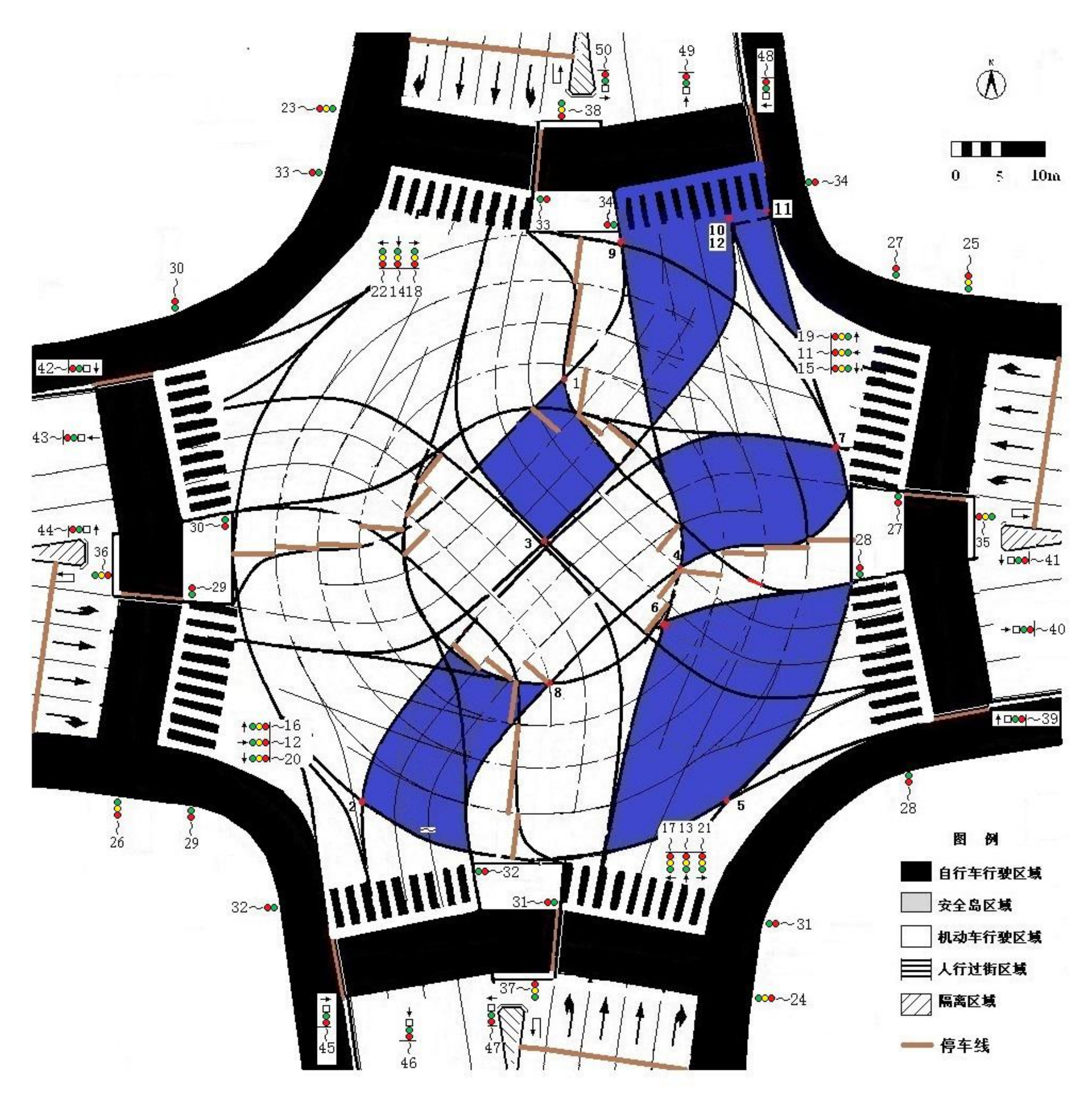


图 4、待行区最优道路渠化方案

Fig.4、 For optimal road channelized scheme with the optimal waiting area

2.13、待行区可不停车原理[11]2015 年：交通存在关系式：距离=速度 x 时间。只要同一待行区 j 长度足够长，而可提前进入时间 G_{jf} 适当短，则车流 j 首车驾驶员可据出口红灯倒计时信息 $t_j \leqslant G_{jf}$，车辆与终点线的距离 $s_j(t)$，合理控制车速 $v_{ej}=s_j(t)/t_j$，在出口绿灯亮时才到达终点线，可合法地不停车越过终点线。

2.14、待行区必须清空：进入待行区所有车辆，皆须在出口放行期间离开待行区。同一车流通过终点线的能力应大于等于通过进口停止线的能力，出口绿灯比进口黄灯迟关闭时间须大于 Max$\{s_j\}$/Min$\{v_{ej}\}$。

2.15、待行区不停车领域是传统可设但未设待行区 TC 领域的扩展定理[15]：TC 的研究领域可无交划分为：不可设待行区领域 U、待行区不停车领域 W 和待行区停车领域 Z 等 3 个；而无待行区 TC 领域可无交划分为：不可设待行区领域 U、可设但未设待行区领域 V 等 2 个部分。V 领域的所有控制方案都是对应 W 领域方案的一特例：首车是以正常车速 v_0 通过待行区且其各可提前进入时间 G_{jf0}=Min{s_j}/v_0。故 V 领域属于 W 领域，V 领域所有概念、术语、公式、自然规律都在 W 领域里存在，表达相似且涵盖范围更广。

此扩展定理使 W 领域的各 TC 理论迅速完善、成熟，避免重新论证。且可相互比较和鉴别。

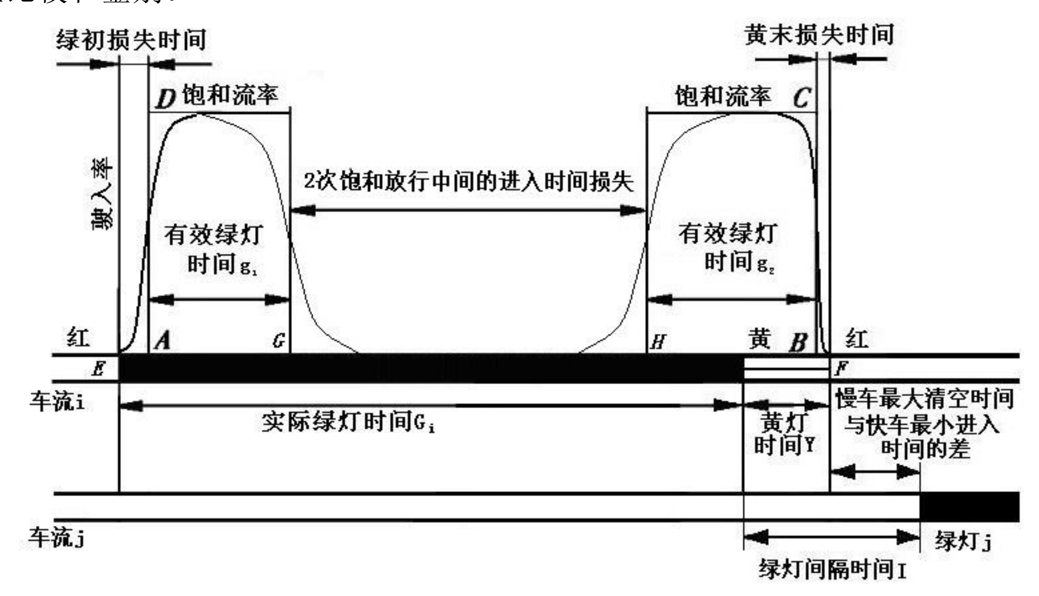


图 5.　待行区停车存在的 2 次饱和放行之间的绿灯时间损失

Fig.5. The green time loss between 2 saturated release

2.16、倍增定理：W 最优方案图 3 与未设置待行区之前 U 领域的传统 TC 最优渠化图 1 和”先左后直“最优方案相比，可使路网瓶颈的十字路口通行能力翻一番。

V 领域的最优方案也是对应 W 方案的一特例。

里程碑创新 9 指出，V 领域最优方案图 2；与之前 U 领域的传统 TC 最优渠化图 1，和相位顺序“先左后直”的最优方案相比，能够提高通行能力 1.4 倍强。

故，要证明倍增定理：只需证明，与 V 领域的最优方案图 2 相比，对应的 W 最优方案图 3 的通行能力，能提高 1.4 倍强，即可。这需要借助如下曲线 2.17，证明如下 2.18-20 的 3 个子定理。

2.17、饱和流率曲线

众所周知，在 TC 的 U、V 领域存在这样一个经典的路口进口停车线的饱和流率曲线[1]1995、[2]1989，由克莱顿(Clayton)于 1940-1941 年提出来的。横轴表示时间，纵轴表示驶过进口停车线的流率，曲线下的面积积分表示驶过进口停车线的累计车流量：如图 6(a)所示。当交通信号转变为绿灯显示时，原先等候在停止线后面的车辆便开始鱼贯地越过停止线，其流率由 0 逐渐增至一个稳定数值，即饱和流率。后续车流越过停止线的流率将继续保持与饱和流率相等，直到停止线后面积存的车辆全放完，或虽未放完，但放行时间已经截止。

图 6(a)与传统图略有不同：右下角的文字“慢车最大清空时间与快车最小进入时间的差”，代替了传统图的“红灯清空时间”，具体原因就是因为存在新

提出的最短绿灯间隔时间计算式(2)。

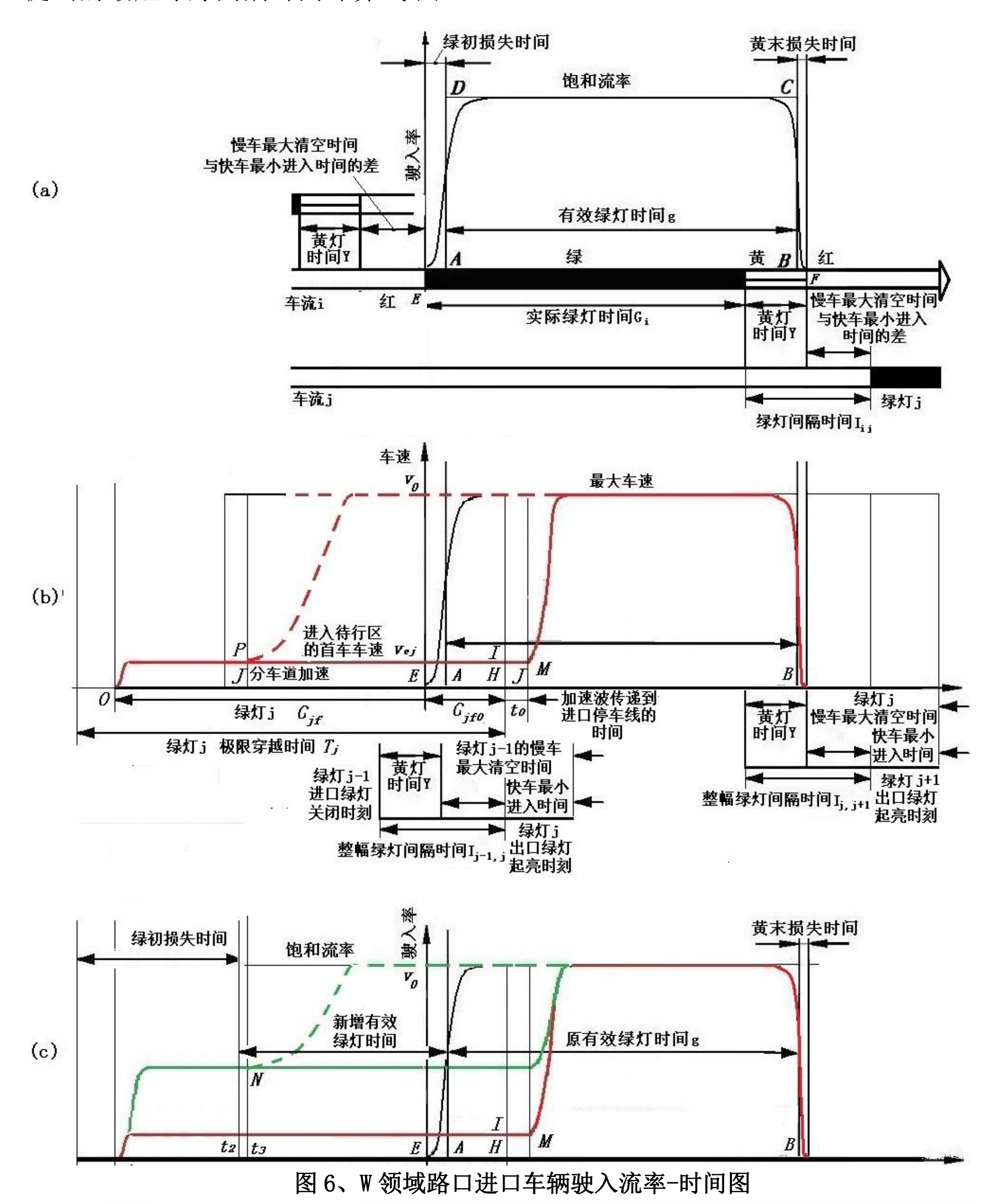


图 6、W 领域路口进口车辆驶入流率-时间图

Fig. 6 The entrance stop line flow rate-time chart, which waiting area without stop

图 6(a)中，流率曲线与横轴之间的面积是路口对该车流的放行能力。等面积的矩形 ABCD 与最大饱和流率等高。根据图 6(a)，传统 TC 有如下定义：

传统进口有效绿灯时间 G_{ej}是允许以饱和流率放行的时间，即绿灯时间与黄灯时间的和减去绿灯损失时间。等于高矩形 ABCD 的长度 AB：

$$G_{ej}=G_j+A-l=C\lambda_j \tag{6}$$

式中： G_{ej}——车流 j 的有效绿灯时间，(s)；

G_j——车流 j 的绿灯时间，(s)；

A——黄灯时间，(s)；

l——绿灯损失时间，(s)；

C——周期，(s)；

$\lambda_j=G_{ej}/C$，——绿信比。

如图 6、图 5。有

2.18、进口绿灯损失时间 l 是，在所有可合法进入路口的时间内，不能以饱和流率通行的时间。

绿灯损失时间 l **值定理：**待行区不停车可消除 2 次饱和放行中间的绿灯时间损失 l_1，使 l 只存在于进口放行时间的始、末；可因待行区内车道数量增加而缩小；大小依赖于对应的可提前进入时间，故各车流不统一，应赋予脚码。

定理显然。故有

待行区不停车进口有效绿灯时间与传统 G_{ej} 的差别是增加了 G_{jf} 一项：

$$G_{ej}=G_j+A+(G_{jf}-l_j)=C\lambda_j \quad (7)$$

对于在城市道路上的汽车连续流，饱和流率与车速不是同一个物理概念：

饱和流率 Q**:** 是路口假定绿信比等于 1 的情况下，所能通过的最大流量，属于瞬时状态值，pcu/h.与流量采用同样的单位。

饱和车头时距 Y**:**是流量饱和时前车车头与后车车头之间越过同一地点的时间距离，sec/pcu,与饱和流率互为倒数关系。统一单位制后存在：$Y=1/Q$。

地点车速 V**:** 是车辆通过某一地断面的瞬时车速，km/h。

车头间距 D**:** 是在同向行驶的车流中，前后相邻两辆车头之间的空间距离，俗称安全间距。统一单位制使用单位 km/pcu。

车流密度 K**:** 指某一瞬间，单位道路长度上存在的车辆数（实体数）。反映车辆的密集程度。是一个瞬间值。与车头间距 D 互为倒数关系，即 $K=1/D$，统一单位制使用单位 pcu/km。

此 5 者可描述路口停止线截面上车辆驶入状态。

在单位制保持一致的前提下，此 5 者之间存在如下关系式(还有前面 2 个互为倒数关系式)：

$$D\times Q=V \quad (8)$$

$$V=Q/K \quad (8)'$$

$$D=V\times Y \quad (8)''$$

故可假设图 6(a)就是某 V 领域路口最优方案图 3 的某车流 j 在进口停车线截面上流率图。则该车流在进口停止线截面上车辆驶入车速-时间的变化规律，可表示为图 6（b)中的黑线。横轴表示时间，纵轴表示驶过进口停车线的车速，曲线下的面积积分表示首车从进口停车线开始驶过的累计路程长度。由于流率与车速之间存在有关系式(8)，如更换必要的单位制比例尺坐标，图 6（b)中的速度黑线完全可与图 6(a)的流率黑线用同样的曲线进行表示。

因 V 领域的最优方案图 2 是对应 W 领域方案图 3 的一特例。故可在同一坐标系中进行比较、鉴别、评价、分析。

图 6（b)的 H 点就是 V 领域控制方案图 3 首车由进口停车线出发，以正常车速 v_0 到达待行区终点线的时刻点。所用时间 G_{jf0}=Min{s_j}/v_0,即为其可提前进入时间

对应的 W 领域控制方案图 4 的速度，一般可对应使用图 6（b)的红色图线表示为：首车在整幅放行前，以车速 v_{ej} 提前一定时间 G_{jf} 进入待行区，也于图 6（b)的 H 点到达待行区终点线，实现在待行区内不停车。

首车进入速度 v_{ej} 有最小值极限 v_{mej}，故可提前进入时间 G_{jf} 也具有最大值极

限 T_j=Min{s_j}/v_{mej}，是由待行区长度 Min{s_j}，和合理最慢车速 v_{mej}的组合固定值。可提前进入时间 G_{jf}若大于对应的 T_j,就必会出现停车现象。

待行区 j的最短车道长度 Min{s_j}越长，则 G_{jf0}值就越大。可提前进入时间 G_{jf}越大，为实现不停车而采用的首车速度 v_{ej}就越小。图 6(b)中 H 点右侧红实线与横轴之间的面积,就是 $v_{ej}\times G_{jf}=v_0\times G_{jf0}$,就是待行区 j的最短车道长度 Min{s_j}。故要扩大 TC2.0 时代新技术的红利，应尽可能扩大 Min{s_j}。

为了比较，可以把图 6(b)中 H 点右侧红实线，等比例大小地绘制在图 6(c)中。但这并不是一条真实的流率线，而是参数比较时的假想参考线。

因首车车速 v_{ej}较小时，比如 1.5m/sec，几乎缩小为正常 v_0的 1/20～1/10;安全间距 D 也会变小，比如小于 10m。使越过路口停车线的饱和车头时距适当变小，比如变化为 5sec/pcu，虽仍然大于正常饱和车头时距 2sec/pcu，但其差别比例远小于速度变化的差别比例。如图 6(c)中红线上面的绿线所示。

而 Q×G_{jf}实际上表示图 6(c)中 H 点左侧绿线下面的面积，即<u>在可提前进入时间期间越过路口停车线的通行能力</u>。

2.19、分道提速定理[7]：在设置了待行区的图 3，通过道路渠化，利用路口内空间资源，可使待行区内的车道数大于进口停车线上的车道数。如前车速度较慢可导致后车愿意分道，使进口停车线上的速度和流率变化呈公比大于 1 的等比级数状上升。从而可较无分道情况大大提高路口放行能力，也同时降低绿灯损失时间 l。

显然，图 6(b)的分道加速过程的开始时刻只能发生在图 6(c)的饱和流率第一台阶到第二台阶过程中。至于分道加速过程的结束时刻则随多种因素确定。

2.20、下面证明，**可提前进入时间与绿灯损失时间的差值**($G_{jf}-l_j$)随 G_{jf}越来越大。这等价于

应尽可能扩大可提前进入时间定理：在相对固定的整幅放行框架下，为增加路口放行交通流的通行能力，应使可提前进入时间尽可能大。

推论；当首单元进入速度=Min{s_j}/G_{jf}时，l 值最小；当 $G_{jf}=T_j$时 l 值最大，最大值可统计确定，与各绿灯间隔时间长短无关。

定理证明：如令(8)式中的 V表示 V 领域的最优控制方案的越过路口停车线的稳态正常车速 v_{ej}，且让(8)式两边同时乘以“可提前进入时间 G_{jf}”，则有

$$D\times Q\times G_{jf}=v_{ej}\times G_{jf}=\text{Min}\{s_j\}=\text{constant} \tag{9}$$

此式(9)是任何稳态条件下都永远成立的。

“Q×G_{jf}”是图 6(c)的流率曲线下面积，代表路口放行该交通流的通行能力。既然该乘积与安全车距 D 相乘等于常数，就是说，安全车距 D 越小通行能力越大。

而安全车距 D 只能是随着车速 v_{ej}变小而变小。

那么在什么情况下车速 v_{ej}变小呢？据(9)式右侧的

$$v_{ej}\times G_{jf}=\text{Min}\{s_j\}=\text{constant} \tag{10}$$

可知，只有可提前进入时间 G_{jf}变大的时候。如图 6(c)中的红色车速虚线对应的绿色饱和流率虚线所示。故**尽可能扩大可提前进入时间定理成立。**

本定理无任何猜想成分，其条件是充分必要的，证明是严格的，任何时候都成立。

此定理是说，在图 6(b)的整幅放行框架不变的情况下，可提前进入时间越大，流率曲线下面积就越大，从而有效绿灯时间就越大。

也鉴于此，TC2.0 只研究、讨论“使可提前进入时间尽可能大”的新技术方案，至于那些不尽可能大的可提前进入时间虽可有很多，但皆可忽略不讨论。设

计就要设计最好的。

2.21、关于倍增定理的讨论。

而图 6(c)中 H 点左侧绿实线与红线之间的部分，就是 TC2.0 时代新技术无分道时增加提高的该交通流的通行能力。与图 6(b)中 H 点左侧红虚线相对应，图 6(c)中 H 点左侧也存在绿虚线，表示因分道提速而引起的流率增加，也是呈等比级数状上升。而图 6(c)中 H 点左侧绿虚线与红线之间的部分，就是 TC2.0 时代新技术有分道时增加提高的该交通流的通行能力。

不难看出，图 6(c)中 H 点右侧绿虚线与红线之间的面积部分相当大，由此折算的 TC2.0 时代新技术有效绿灯时间，至少已相当于无待行区时的有效绿灯时间 1.4 倍强。（见数据例题）。而无待行区方案是已经进行过最优道路渠化的图 2。图 2 的最优道路渠化和最优控制方案可比 2000 年以前的无待行区标准路口图 1 和当时的所谓最优控制方案“先左后直”提高通行能力 1.4 倍强。

这 2 者效益应相乘，提高通行能力就一定可超过 1.4×1.4=1.96 倍，与 2000 年以前的无待行区方案相比，能够达到 2 倍应是可信的。与文[10]的数据例题结果是相互吻合的。

就可以说，TC2.0 新技术可提高路口通行能力一倍多，按照经济学的木桶原理，就相当于凭空再增一个地面路网。

2.22、待行区必须清空：进入待行区所有车辆，皆须在出口放行期间离开待行区。同一车流通过终点线的能力应大于等于通过进口停止线的能力，出口绿灯比进口黄灯迟关闭时间须大于 Max{s_j}/Min{v_{ej}}。

2.23、最大可提前进入时间 G_{mjf} 值可准确计算。见图 7：

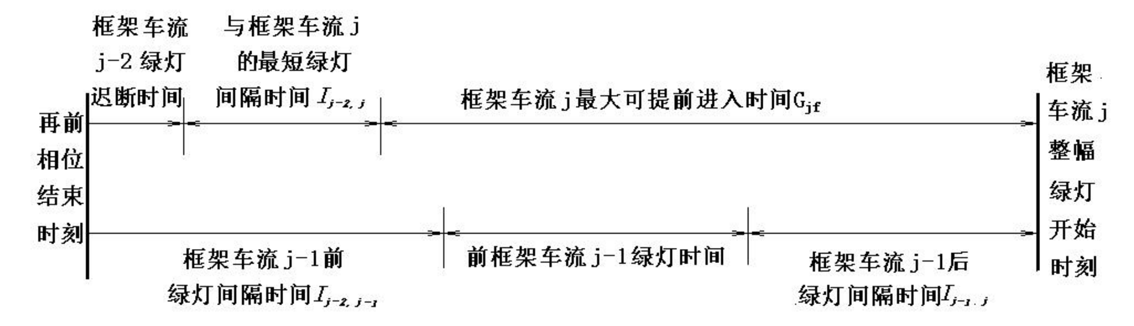


图 7. 限制可提前进入时间的有关因素

Fig.7. The relevant factors of the limited advance enter time

注：此再前交通流绿灯可以是整幅链族图的再前框架车流 *j-2*，若 G_{j-1} 较大；也可是有关非机动车或行人绿灯，若 G_{j-1} 较小；只能取 G_{jf} 所有可能值中的最小值。此值绝对大于 $G_{j-1}+I_{j-1,j}$，后者是传统普遍使用的：提前一个相位时间。也显示了里程碑创新 2.10 的必要性。

$$G_{mjf}=\min\{T_j;\ G_{j-1}+I_{j-1,j}+I_{j-2,j-1}-I_{j-2,j}-GY_{j-2}\} \qquad (11)$$

式中：G_{mjf}——可提前进入时间，(s)；

$I_{j-2,j-1}$——关键路线上前前绿灯间隔时间，(s)；

G_{j-1}——关键路线上前整幅绿灯时间，(s)；

$I_{j-1,j}$——关键路线上前绿灯间隔时间，(s)；

GY_{j-2}——关键路线上再前绿灯迟断时间，(s)；

$I_{j-2,j}$——关键路线上与前车流 *j-2* 间的绿灯间隔时间，(s)。

2.24、有待行区的路口最短绿灯间隔时间的计算方法依然按照(2)式计算，只是终点线后关键点的进入距离从终点线起算，终点线前关键点的进入距离从终点线起算，清空距离皆从进口停车线起算。这导致

$$L=\sum(\mathrm{Max}\{t_{ci}\}-\mathrm{Min}\{t_{ej}\})+X-\sum(G_{jf}-l_j) \quad (12)$$

式(12)中较(4)增加的“$-\sum G_{jf}$”，是因终点线前后车速存在巨大差异而从进入时间 t_{ej}中分离出来的。显示了 TC2.0 倍增通行能力的时间来源。由文[11]给出的 11 个数据例题表明：与 TC1.0 方案相比，TC2.0 技术可倍增路口乃至路网通行能力，相当于再建个地面路网。

2.25、待行区分道提速：待行区车道数大于进口车道数，若前车速度较慢可导致后车通过分道行为，使车速和流率皆高于前车，从而可按等比级数的比例快速提高车速和流率，并较无分道大大降低绿灯损失时间 l；后车的车速和流率各自到达一定的上限稳定值之后将不再提高。后车车速的最大稳定值即最大清空车速，后车流率的最大稳定值即饱和流率。

2.26、待行区路口通行能力是路口各交通流通行能力的总和；其中框架车流 j 的通行能力为 $G_{ej}n_jQ_{sj}/C$，Q_{sj}为单车道饱和流量；是通过其进口车道数 n_j和进口有效绿灯时间内通行能力的乘积。有：

$$G_{ej}=G_j+A+G_{jf}-l_j=C\lambda_j \quad (13)$$

式中： G_{ej}——车流 j 有效绿灯时间，(s)；

G_j——车流 j 绿灯时间，(s)；

G_{jf}——车流 j 提前进入时间，(s)；

A ——黄灯时间，(s)；

l_j——绿灯损失时间，(s)；

C——周期，(s) 。

2.27、方案框架：先直后左链族的 TC2.0 方案框架只与终点线后冲突点的绿灯间隔时间有关，与首车进入速度无关，后者只影响绿灯损失时间 l 和各绿信比 λ。

2.28、待行区通行能力最优化：在待行区不停车领域，以关键路线上有效绿信比总和 $\Sigma\lambda_j$最大为指标，有

① 最优渠化可使各待行区最小行程距离 $\mathrm{Min}\{s_j\}$最大，可最大化极限穿越时间 $T_j=\mathrm{Min}\{s_j\}/\mathrm{Min}\{v_{ej}\}$；

② 最优渠化让待行区的车道数尽可能多，从而可提高后续车速，缩小绿灯损失时间 l；

③ 在不大于 T_j前提下，尽可能扩大各对应可提前进入时间 G_{jf}，伴有前冲突车流的整幅绿灯时间 G_{j-1}尽可能大，可使各框架车流通行能力最大化；

④ 选择各进口“先直后左”链族，使各整幅链路周期损失时间 L 的平均值最小[9]和[10]；

⑤ 设置出口红灯信号倒计时，可诱导首车根据出口红灯倒计时 t 信息和到二次停止线距离 s，自我控制不停车车速 $v_{ej}=s/t$；

⑥ 设置进口红灯、黄灯信号个位倒计时，可降低绿灯损失时间 l；

⑦ 选择绿灯间隔时间最小相容组合设计；

⑧ 使方案配时在线自适应各向流量需求。

2.29、TC2.0 的自适应控制设计方法：

① 离线预先设计各最大有效绿灯时间配时方案数据库。流程如图 8。

② 根据交通需求，在线动态搜索匹配合适方案。这需信号机在线实现，关键是快，简便易行。应把里程碑 8 同时解决的 5 个关键问题简化为一个，在饱和

时使关键路线上 $\Sigma\lambda_j$ 最大；且在未饱和时，能与流量需求比例有最佳匹配自适应，在使所有 $\lambda_j \geq \underline{\lambda}_j$, j∈$\underline{8}$ 的前提下，使周期 C 最小。只包含 6 步。如图 9。

③ 选一个恰当的时间用新方案代替旧方案。

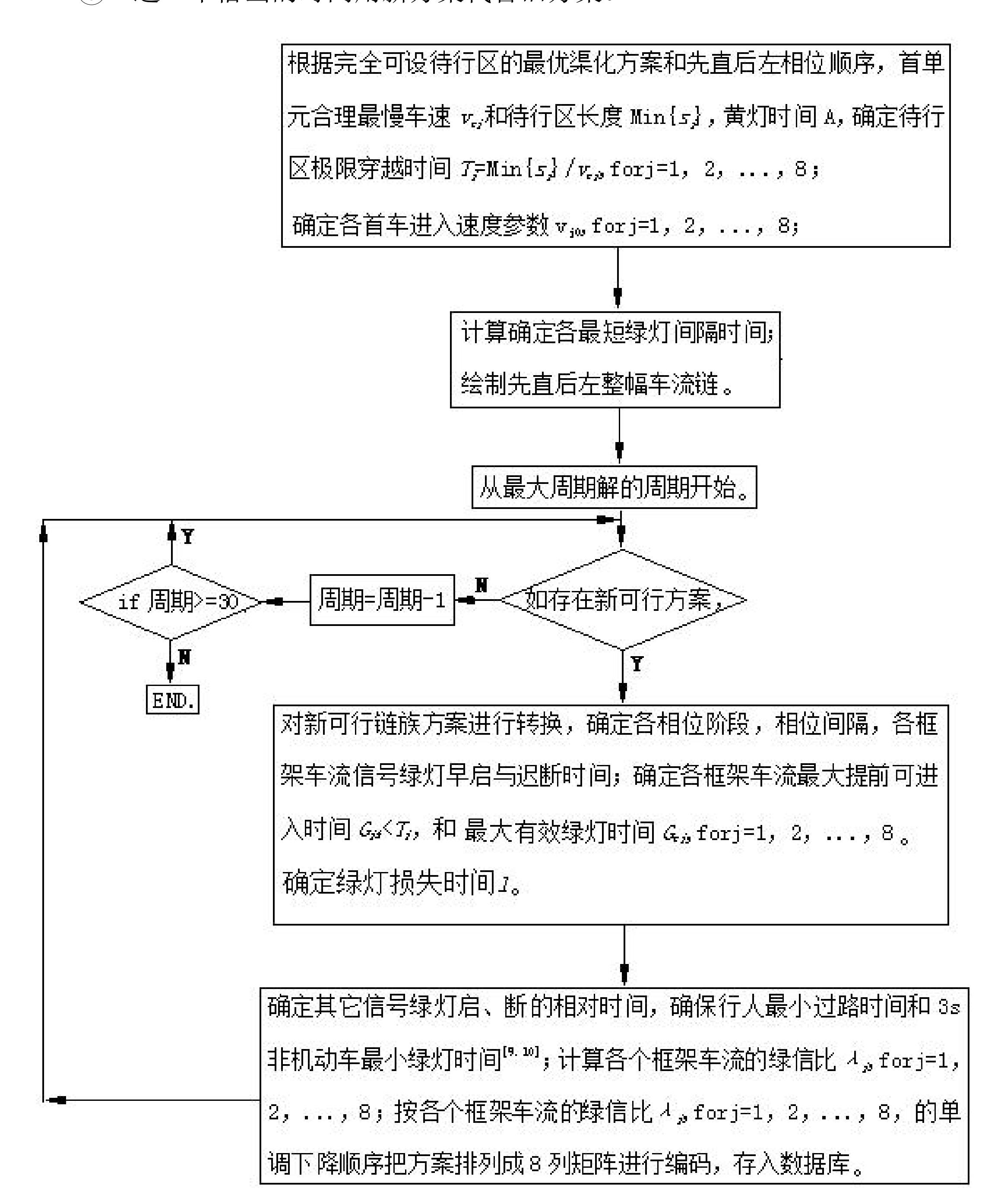


图 8、离线数据库方案设计流程

Fig.8, the process of adaptive scheme design

2.30、方案转换原则：新方案替代现行方案的转换过程必须保证交通安全，保证各绿灯间隔时间不小于对应最短值；保证所有倒计时和行人绿闪显示信息真实可信。

2.31、方案转换的安全措施：转换选择在新旧方案多数灯色一致且倒计时显示信息一致的时刻开始；如恰逢某灯色、信息不一致，则只延迟所涉及的信号灯转换时刻到灯色一致的时刻再开始。若新方案绿灯开始时刻比对应旧绿灯早，则延迟新方案绿灯开始时刻。若旧方案绿灯结束的比对应新绿灯晚，则提前压缩旧对应绿灯时间；对于已最小的行人和非机动车绿灯不能压缩，只能从其前面的各绿灯时间开始压缩；压缩到满足需要为止此外照顾不周之处，遵照"首车让行尾单元"的规定执行。

方案转换，需损失一些交通流的放行能力。此损失源于方案之间存在的较大差异。如自适应频率加快，在几乎相同的整幅框架之下，方案之间的差异必然减小。在首车速度相当慢的情况下，遵照"首车让行尾单元"的规定，损失可压缩到很低很低。可使控制方案与交通需求的适应度大大增加。

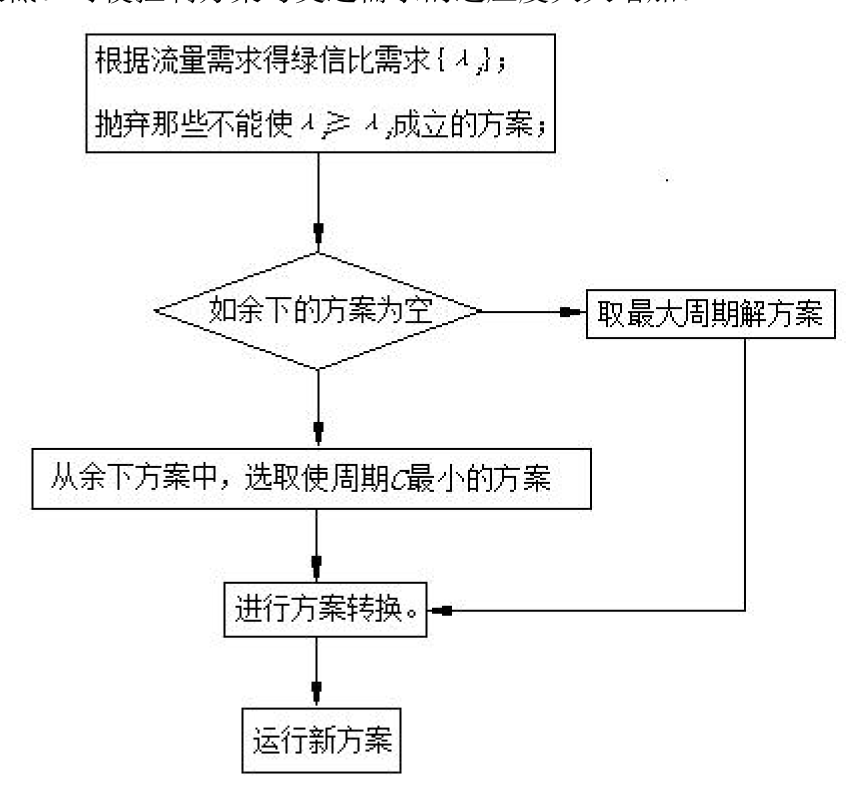


图9、方案在线自适应搜索流程

Fig.9, the process of adaptive scheme design

2.32、云诱导与云导航：若在上一路口的出口，通过信息诱导屏提供"xxx m外的下一个路口出口绿灯（不是进口绿灯，可摆脱路口排队长度的困扰)开始时间为xx s"，可帮助自控车速=距离/时间，把整个路段当作不停车的待行区，增加该路口与相邻路口间实现不停车协调控制机会。

此信息允许出现跳变。故对路口方案自适应转换不会构成强硬约束。

此信息可通过上一路口的出口网络蓝牙通讯，发布到路过车辆的手机GPS上，增强手机的"云"导航功能。

动画演示、直观图示、数字分析，都可展示TC2.0方案的可行性，高安全、高秩序、高效率。可复制、可推广。

3、推广的超级营销策划案和组合拳

TC2.0 技术存在诸多创新，应用时需立告示牌，广泛告知路人，避免不敢走、不会走或违法走。安全第一。

告示牌上可安装行人信号灯，安装车辆和行人的检测器和摄像头；还可安装能够与车辆通讯的蓝牙设备；可与中心联网；帮助构成物联网、互联网；...

这都是 TC2.0 推广应用的副产品，存在巨大附加值。

在其技术推广中，有效利用推广应用的副产品，还可实现企业、广告商，人民和政府互利多赢。“羊毛出在狗身上，猪来埋单”的策划案。

全世界迫切需求缓解方法的市场正在持续发酵。发生交通伤害和拥堵的根源是有限增长的道路与无限增长的汽车之间的矛盾。此矛盾尚不能根除，只能采用各种缓解方法的组合拳：修立交、修地铁、修快速公交、车辆限号通行、收交通拥堵费、拆墙把私有道路拿出公用。TC2.0 技术与这种组合拳互补，可进入增加其威力。

打造有自主知识产权的 TC2.0 时代经济体系，倍增地面路网的通行能力，可纳入智慧交通[24]的范畴，如果智慧交通各个领域都出现这样的革命性变革，则是一个崭新的浩瀚工程，不可能一蹴而就。欢迎各界人士加盟，共同交流、探讨，树立更多里程碑式创新，争当 TC2.0 时代发展的先锋。尽早制定 TC2.0 标准，推广 TC2.0 专利技术，享受 TC2.0 红利。最最重要的是及早改变日益严峻的拥堵交通，能让人们能及早享受到“畅通生活”。

毕竟，发展才是硬道理。

面对蓄势待发的新一轮科技革命，...如果我们不识变、不应变、不求变，就可能陷入战略被动，错失发展机遇，甚至错过整整一个时代。

——习近平

参考文献

[1]吴兵，李晔，交通管理与控制（第 5 版）[M]，北京：人民交通出版社，2015 年。

[2]全永燊，城市交通控制[M]，北京：人民交通出版社，1989。

[3]2011-2020 年，联合国大会在 2010 年 3 月通过的 A/RES/64/255 号决议[EB/OL]，http://www.who.int/roadsafety/decade_of_action/zh/ ，联合国秘书长潘基文先生。

[4]王茜，王大海，按半幅路权进行路口交通流分离的方法和交通信号机[P]，2001-11-28 专利文献公开-CN1324062。

[5]王大海，王茜，多相位交叉口半幅路权控制系统及其变形的设计方法[J]，《公路交通技术》，2005，No.4.

[6]王殿海，李丽丽，陈永恒，机动车左弯待转区设置的临界条件[J]，《公路交通科技》2009 年 11 期。

[7]章国鹏，信号交叉口左弯待转区的安全研究[D]，2015。

[8]倪颖，李克平，徐洪峰，信号交叉口机动车左转待行区的设置研究[J]，《交通与运输》2006（B12）：32-36。

[9]王大海，王茜，可具有负系统损失时间的动态信号控制系统的控制方法[P]，专利 ZN101010103079.2；以此为优先权的国际专利[P]，PCT/CN2011/070879，交通信号控制系统、设计方法和特殊设备，目前已获俄罗斯、美国、澳大利亚专利授权。

[10]王大海，王茜，周期损失时间 *L* 进入负值的精细化最优自适应交通信号控制[J]，第九届中国智能交通年会优秀论文集，电子工业出版社，2014 年 10 月。P.191-200。

[11]王大海、王茜，不停车通过待行区的交通信号精细化控制与优化[J]，北京，《道路交通与安全》，2015 年第 1 期，P52-57。CN201510178579.5 以 CN201410382407.5 为优先权的专利申请。

[12][德]道路与交通工程研究学会编，李克平译，交通信号控制指南——德国现行规范(RiLSA)[M]，Edition 1992, 北京：中国建筑工业出版社，2006 年 5 月。

[13]石建军著，《交通行为控制原理》[M]，北京：人民交通出版社，2009，第 130 页。
[14]唐琤琤等著,《道路交通标志和标线手册》[M]，北京：人民交通出版社，2009 年。 GB5768-1999 和 2009。
[15]曹则贤, 内涵都在表面上[J]，《现代物理知识》2012 年第 01 期。
[16]邱仁宗著，科学方法和科学动力学——现代科学哲学概述（第三版)[M]，北京：高等教育出版社，2013 年。
[17]李超;郑长江;周江涛;陈雅群;倒计时信号灯绿灯间隔时间设置研究[J];中国安全科学学报;2013 年 01 期
[18]左天福;陶晟陶;关于设置平面交叉口直行待行区的思考与实践[J];交通与运输(学术版);2011 年 01 期
[19]宗二凯，邵长桥，设有待行区的左转车道通行能力计算方法研究[J]，《武汉理工大学学报》2011 年 10 期
[20]尚德申，王山川，王文红，信号交叉口直行待行区的设置研究[J]，《中外公路》2010 年 2 月第 30 卷第 1 期。
[21]贺电，张兆瑞，李英娟等著，道路交通管理创新论[M]，北京：中国人民公安大学出版社，2014 年。
[22]刘明海著，还原论研究[M]，北京：中国社会科学出版社，2012 年。
[23]龙科军;陈群;道路网络交叉口“禁左”交通组织优化[J];北京工业大学学报;2011 年 06 期。
[24]陈才君，柳展，钱小鸿，秦俊峰编著，智慧交通（第 2 版)[M]，北京：清华大学出版社，2015 年。
[25]王大海、王茜，图解能倍增地面路网通行能力的 TC2.0 新技术[J]。待发表。

(通讯作者: 王大海　E-mail:　wang6dh@163.com)

作者贡献声明:

王大海：提出研究思路，设计研究方案;
王茜：论文最终版本修订。